

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی ریزساختار و خواص سایشی نانوکامپوزیت آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu تقویت شده با نانوذرات SiC بعد از عملیات حرارتی پیرسختی*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[(١)]

DOI: 10.22067/jmme.2022.79507.1084

چکیده در این تحقیق، خواص سایشی و ریزساختار نانوکامپوزیت آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu تقویت شده با ١، ٢، ٣ و ٥ درصد نانوذرات کاربید سیلسیم (SiC) تولید شده به روش ریخته گری گردابی با کمک حباب زائی مافوق صوت بررسی شد. جهت اختلاط مناسب آلیاژ و نانوذرات از دستگاه مافوق صوت مجهز به سیستم خنک کننده با توان ٢٠٠٠ وات استفاده شد. همچنین برای مطالعات ریزساختاری، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار گرفته شد. مطالعات ریزساختاری نانوکامپوزیت نشان داد که حضور نانوذرات پراکنده SiC باعث کاهش اندازه دانه شده، اما در درصدهای بالای این نانوذرات (٥٪ وزنی)، کاهش محسوسی در اندازه دانه ایجاد نمی‌شود. همچنین حضور نانوذرات و کاهش اندازه دانه، افزایش چشمگیر سختی و مقاومت به سایش نانوکامپوزیت را به همراه دارند. البته در درصدهای بالای نانوذرات SiC (٥٪ وزنی)، این ذرات در مرزدانه ها کلوخه ای شده و باعث کاهش سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت شدند. نانوکامپوزیت تقویت شده با ٣٪ وزنی نانو ذرات کاربید سیلسیم قبل و بعد از عملیات حرارتی بهترین مقاومت به سایش را نشان داد که بهینه ترین درصد نانو ذرات کاربید سیلسیم می باشد.

واژه های کلیدی نانوکامپوزیت ریختگی، نانوذرات کاربید سیلیسیم، ریخته گری گردابی، فرآوری مافوق صوت.

Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al-8Zn-3Mg-2.5Cu Nanocomposite Reinforced with SiC Nanoparticles after age Hardening Heat Treatment

Mohammad Alipour

Abstract *In this study, microstructure and wear properties of Al-8Zn-3Mg-2.5Cu nanocomposite reinforced with 1, 2, 3 and 5 wt.% SiC nanoparticles (SiCnp) produced by stir casting and ultrasonic treatment have been investigated. Ultrasound device equipped with a cooling system with 2000 W powers was used for mixing alloy and nanoparticles. Also scanning electron microscopy was used for microstructure studies. The microstructure of nanocomposite was investigated by scanning electron microscope.The microstructural studies of the nanocomposite revealed that SiCnp addition reduces the grain size, but adding higher SiCnp content (5 wt.%) does not change the grain size considerably. Further investigations on hardness revealed that the addition of SiCnp increases hardness and wear resistance. At higher SiCnp contents (5 wt.%), the presence of SiCnp agglomerate on grain boundaries was found that causes decrease the hardness and wear resistance. The optimum amount of nanoparticles before and after heat treatment is 3 wt.% SiCnp that nanocomposite exhibits best wear resistance.*

Keywords Casting nanocomposite, SiC nanoparticles, Stir casting, Ultrasonic treatment.

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠١/٨/١٧ و تاریخ پذیرش آن١٤٠١/١٠/٧ می‌باشد.

(١) استادیار، مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

کامپوزیت¬های زمینه فلزی از جمله مهمترین انواع مواد پیشرفته می باشندکه قدمتی بیش از ۵۰ سال دارند. این نوع کامپوزیت ها در صنایع زیادی همانند صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت مورد استفاده می باشند [1-3]. ازجمله کامپوزیت¬های زمینه فلزی، کامپوزیت¬های زمینه آلومینیمی هستند، که به دلیل مزایایی از قبیل دانسیته پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی، مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا و خودرو دارای کاربرد گسترده ای هستند [3-6].

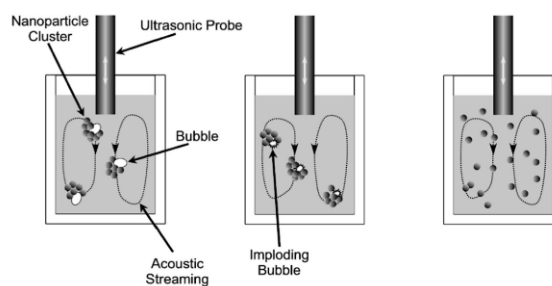
کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب همزمان، آلیاژسازی مکانیکی و روش های گوناگون ریخته گری نظیر ریخته گری کوبشی، ریخته گری نیمه جامد، ریخته گری گردابی و دیگر روش ها تولید می شوند [3,7]. روش ریخته گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حا صله به مدت زمان معینی هم زده می شود، سپس با روش های متداول، ریخته گری انجام می گیرد [7].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیم نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت¬های تهیه شده از روش ریخته گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته گری به دلیل گرانروی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت¬های ریخته گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت¬های زمینه فلزی ذره-ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می شود [7].

در روش حباب سازی مافوق صوت، مخلوط مذاب–نانوذرات تحت تأثیر امواج مافوق صوت شدید قرار می گیرند. این عمل به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می شود. از جمله مهمترین اثرات این امواج که به اثرات غیرخطی معروفند، حباب زائی گذرا و جریان صوتی است [8,9]. جریان صوتی که برای هم زدن بسیار با ارزش است، حرکت مذاب در اثر شیب فشار صوتی است. حباب زائی در بر گیرنده تشکیل، بزرگ شدن و فروپاشی یا منفجر شدن حباب است. در ساخت نانوکامپوزیت ها به کمک امواج مافوق صوت در مرحله نخست خوشه های نانوذرات موجود در مذاب توسط اثر حباب زائی امواج از بین می روند و در مرحله بعد نانوذرات مجزا توسط پدیده جریان صوتی به طور یکنواخت در داخل مذاب پراکنده می شوند (شکل ۱) [10].

از آنجائی که هوا در حفرات موجود در خوشه های نانوذرات حبس شده است، بنابراین هوای حبس شده به عنوان جوانه ای برای تشکیل حباب ایفای نقش می کند. در مراحل اولیه افزودن نانوذرات به مذاب تعداد خوشه ها بسیار زیاد است، بنابراین تعداد حباب های تشکیل شده نیز زیاد خواهد بود. حباب های بوجود آمده در حین سیکل فشاری منفی رشد می کنند و پس از بزرگ شدن تا اندازه مشخص در حین سیکل فشاری مثبت به طور ناگهانی از هم پاشیده می شوند. حباب های ریزی که در مدت زمانی کمتر از ۱۰–٦ ثانیه منفجر می شوند، نقاط گرم میکرونی گذرا را ایجاد می کنند. دما و فشار این نقاط به ترتیب ۵۰۰۰ °C و بالای ۱۰۰۰ اتمسفر است. هم چنین سرعت گرم شدن و سرد شدن این نقاط در حدود ۱۰۱۰ K/S است [9].

حباب های گذرا ضربات انفجار گونه به خوشه ها و کلوخه های نانوذرات وارد می کنند و از این طریق خوشه های نانوذرات را می شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهائی نانوکامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [8]. بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندریتی فاز زمینه نانوکامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچک تر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [9].



شکل ۱ شماتیک تاثیر کاویتاسیون و جریان گردابی ناشی از امواج مافوق صوت برای پخش یکنواخت نانوذرات در داخل مذاب [10].

مطالب یاد شـــده از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری نانوکامپوزیت نســبت به آلیاژ پایه محســوب می شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نسبتاً مطلوب اســت و همواره تعدادی خوشــه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرزدانه ها و یا در امتداد مرزدانه ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه ها یا بازوهای دندریتی فاز زمینه پراکنده شــده اند [8].

در پژوهش حاضر روش جدیدی برای توزیع بهتر نانوذرات و همچنین اصلاح بیشتر ریزساختار بر مبنای فرآیند ذوبی به کمک فرآوری مافوق صوت در نظر گرفته شده است. بر این مبنا نانوذرات کاربید سیلسیم (SiC_{np}) بعد از آسیاب کاری پرانرژی و کامپوزیت شدن با پودر میکرونی آلومینیوم به مذاب اضافه شده و تحت فرآوری ریخته گری گردابی و مافوق صوت قرار می‌گیرند. سپس ریزساختار زمینه و خواص نانوکامپوزیت بررسی می‌شود. به دلیل اهمیت آلیاژهای سری ۷xxx در صنایع پیشرفته، آلیاژ Al-8Zn-3Mg-2.5Cu به عنوان آلیاژ زمینه در ساخت نانوکامپوزیت انتخاب شده است. در رابطه با نوآوری پژوهش حاضی می توان به این نکات اشاره کرد:

۱- ساخت نمونه نانوکامپوزیت در دو مرحله که مرحله اول که شامل استفاده از متالورژی پودر می باشد باعث پخش بهتر و یکنواخت تر نانوذرات داخل مذاب آلومینیوم خواهد شد که در مقالات به ندرت از این روش استفاده شده است و نبود کار تحقیقاتی در رابطه با آلیاژهای سری ۷۰۰۰

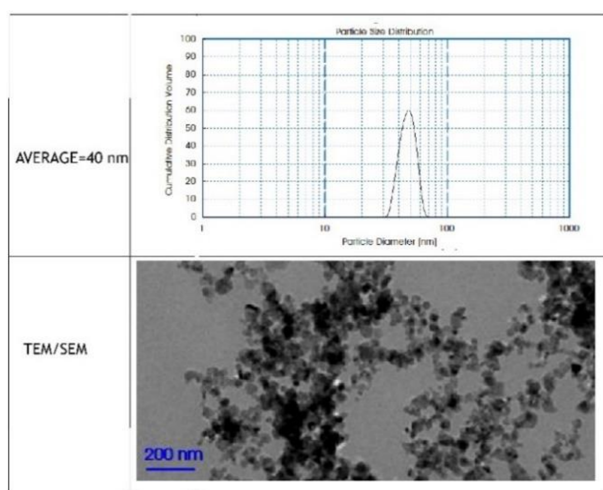
۲- تاثیر درصدهای مختلف نانوذرات کاربید سیلسیم بر روی رفتار سایشی آلیاژ Al-8Zn-3Mg-2.5Cu.

روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu با ترکیب مشخص شده در جدول (۱) و نانوذرات SiC و پودرهای میکرونی آلومینیوم با ابعاد ٤۰ میکرومتر برای ساخت نانوکامپوزیت AlAl-8Zn-3Mg-2.5Cu-SiC استفاده شد. از جمله ویژگی های نانوذرات می توان به متوسط اندازه بین ۳۵ تا ۵۰ نانومتر و خلوص بالای ۹۹ درصد وزنی اشاره کرد. در شکل (۲)، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) با مدل EM 208 ساخت شرکت Philips و آنالیز اندازه برای نانوذرات SiC نشان داده شده است. در این تحقیق نانوذرات SiC در درصدهای وزنی ۱ تا ۵ درصد به مذاب آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu اضافه شدند تا حالت بهینه بدست آید.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu (درصد وزنی).

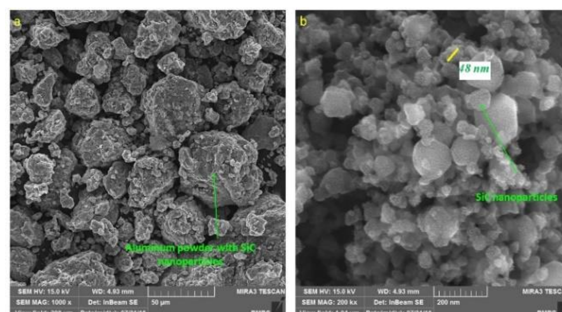
Mn	Si	Fe	Zr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al	element
۰,۱	۰,۱۲	۰,۱	۰,۱۵	۰,۱.	۲,٤	۳	۸,۲	تعادل	%



شکل ۲ آنالیز اندازه و تصویر TEM از نانوذرات SiC.

برای افزودن نانوذرات به مذاب از روش ساخت پودر کامپوزیتی با استفاده از آسیاب کاری پرانرژی مدل NARYA-MPM 2*250 H استفاده شد. در این روش ابتدا مخلوطی از نانوذرات SiC و پودر آلومینیومی با ابعاد ٤۰ میکرومتر در داخل آسیاب پرانرژی به مدت ۲ ساعت تحت

عملیات آسیاب قرار گرفتند تا پودر کامپوزیتی آلومینیم با نانوذرات SiC حاوی ۳۰ درصد نانوذرات و ۷۰ درصد پودر آلومینیوم بدست آید. سپس کامپوزیت پودری حاصل به مذاب افزوده شد. در شکل (۳)، تصویر پودر کامپوزیتی $Al\text{-}30SiC_{np}$ نشان داده شده است.



شکل ۳ تصویر پودر کامپوزیتی Al-30SiCnp بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پرانرژی.

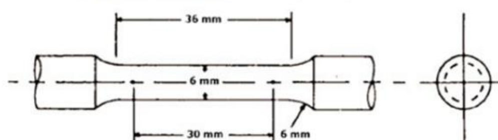
برای ساخت نمونه های مختلف ابتدا مقدار مناسب از آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu در داخل بوته گرافیتی قرار داده شد. مجموعه مذکور در داخل یک کوره مقاومتی با دمای ۷۵۰درجه سانتیگراد قرار داده شد. پس از ذوب کامل آلیاژ و پس از فرو بردن همزن در مذاب، عمل هم زدن و افزودن نانو پودر کامپوزیتی به مذاب صورت گرفت. سرعت همزن ۵۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و مدت زمان اعمال همزن مکانیکی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از پایان پذیرفتن عمل هم زدن، بوته از کوره خارج شده و بعد از کنار زدن لایه سرباره، مذاب به مدت ۳۰ ثانیه تحت عملیات مافوق صوت با توان ۲۰۰۰ وات قرار گرفت. سپس مذاب حاصل در داخل قالب فلزی (شکل ٤) ریخته شد. از قسمت وسط نمونه های حاصل از این قالب نمونه های استوانه ای به ارتفاع ۱ سانتی متر با قطر ۱ سانتی متر تهیه گردید. سطح این نمونه ها ابتدا با کاغذ سمباده های ضدآب ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ تحت عمل سمباده زنی قرار گرفت. سپس سطح نمونه ها پولیش شد و در محلول یک درصد حجمی اسید هیدروفلوئوریک در آب برای مدت ۳۰ ثانیه اچ گردید.

ریزساختار نمونه های مذکور ابتدا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با مدل VEGA\\TESCAN-LMU در بزرگنمائی های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی از این بررسی، پی بردن به نقش نانوذرات بر اندازه و شکل بازوهای دندریتی، فاز یوتکتیک، نحوه توزیع نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت، ریزساختار نمونه های مختلف و دیگر فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ مورد نظر بود. برای ارزیابی رفتار سایشی طبق استاندارد ASTM-G99 از آزمون سایش پین بر روی دیسک استفاده شد. آزمون سایش در دمای محیط و تحت نیروی ۲۰نیوتن انجام شد. برای بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تولیدی و تاثیر عملیات حرارتی بر روی خواص سایشی نانوکامپوزیت، عملیات حرارتی T6 بر روی نمونه ها انجام شد. شرایط عملیات حرارتی به قرار زیر می باشد: همگن کردن ساختار در دمای ٤٥٠ درجه سانتیگراد به مدت ۸ ساعت، کوئنچ به دمای محیط، نگهداری در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲٤ ساعت. برای انجام سختی از روش سختی سنجی برینل استفاده شد.

الف



ب

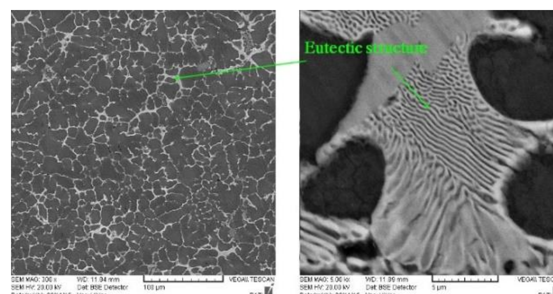


شکل ٤ تصویر الف) قالب ریخته گری، ب) ابعاد نمونه تست کشش.

نتایج و بحث

مطالعات ریزساختاری آلیاژ پایه و پودر نانوکامپوزیتی. نکته مهمی که باید بدان اشاره شود اندازه و شکل پودرهای میکرونی آلومینیوم می باشد. اندازه اولیه این پودرها ٤٥ میکرون بود، اما بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری پرانرژی، اندازه و شکل پودرها تغییر کرد. عملیات انجام شده سبب شد که شکل پودرهای میکرونی از کروی به صفحه ای و اندازه آنها نیز کاهش یابد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شد، بعد از اضافه کردن نانو پودرهای SiC به پودرهای میکرونی و بعد از عملیات آسیاب کاری پرانرژی، نانو پودرهای SiC به صورت یکنواخت در داخل پودرهای آلومینیومی پخش شده اند.

آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu دارای عناصـــر آلیاژی اصلی روی، منیزیم و مس می باشد. تصویر SEM ارائه شده در شکل (۵) نشان می دهد که این آلیاژ دارای ساختار یوتکتیکی در مرزدانه ها می باشد.



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار و یوتکتیک مرزدانه ای آلیاژ پایه آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu.

توزیع نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی. توزیع نانوذرات در زمینه، تحت تأثیر اتفاقاتی است که در مذاب در حین پراکنده ساختن نانوذرات و قبل از ریخته گری روی می‌دهد. همچنین متاثر از پدیده هایی است که در حین انجماد ایجاد می‌شود. در خصوص مورد اول می توان به ته نشین شدن، شناور شدن و حتی کلوخه ای شدن اشاره کرد. در خصوص مورد دوم مهمترین مسأله میان کنش بین جبهه انجماد و نانوذرات است که به فاکتورهای بسیاری وابسته است که از جمله آنها می توان به شکل جبهه انجماد، سرعت انجماد، کسر حجمی نانوذرات، گرادیان دمایی و گرادیان غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد اشاره داشت [11]. بدیهی است که اگر نانوذرات در مذاب از پراکندگی مناسبی برخوردار نباشند، نمی توان انتظار داشت که توزیع نانوذرات در نمونه حاصل شده از انجماد این مذاب مطلوب باشد.

علت این که با افزودن نانوذرات به صورت پودر آمیژان می توان به ساخت نانوکامپوزیت دست یافت را اینگونه می توان بیان کرد که در تهیه پودر آمیژان از روش آسیاکاری پرانرژی استفاده شده است، بنابراین در اثر نیروهای ضربه ای و برشی شدید ناشی از گلوله های آسیاب، خوشه های نانوذرات از بین رفته و نانوذرات به صورت مجزا در زمینه پودر آمیژان توزیع خواهند شد (شکل ۳). توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه پودر آمیژان سبب افزایش فاصله بین نانوذرات و در نتیجه کاهش نیروی جاذبه بین آنها خواهد شد. این موضوع احتمال غلبه نیروی فراهم شده توسط همزن مکانیکی بر نیروی جاذبه بین نانوذرات را افزایش داده و در نتیجه مانع از تشکیل خوشه های نانوذرات در هنگام افزودن پودر آمیژان به مذاب و پس از ذوب شدن ذرات آمیژان می شود.

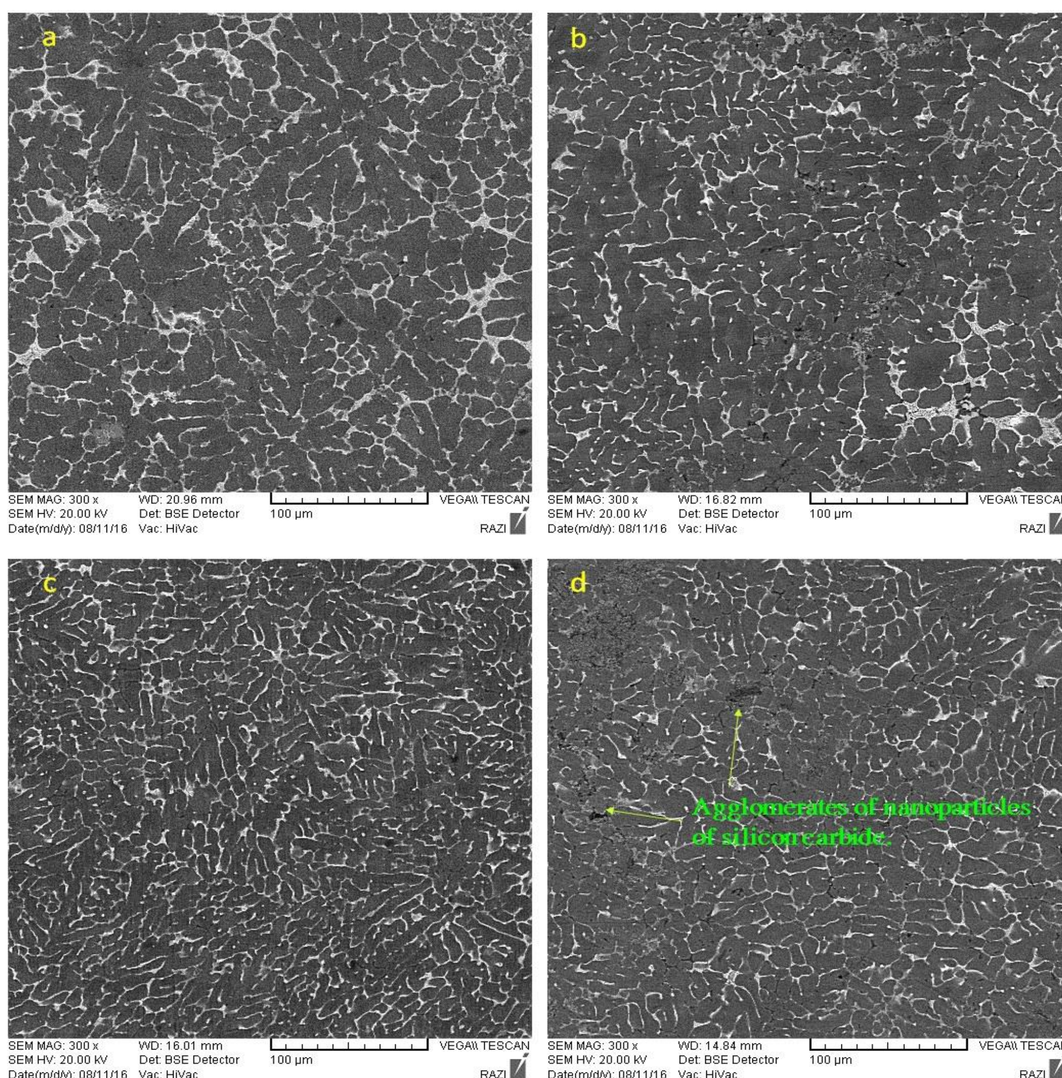
کاملاً مشخص است که هرچه اندازه ذرات در داخل مذاب کوچکتر باشد به نسبت ذرات کلوخه ای شده بزرگتر، این ذرات راحت تر در داخل مذاب حل می شوند. در مجموع پخش شدن نانوذرات در داخل مذاب توسط دو پدیده مهم اتفاق می افتد. در هنگام تزریق پودرهای کامپوزیتی آلومینیوم–SiC به داخل مذاب، انحلال و ذوب شدن شدن پودرهای میکرونی آلومینیوم اتفاق می افتد، در این هنگام چون نانوذرات SiC با عملیات آسیاب کاری پرانرژی در داخل پودرهای آلومینیوم قرار گرفته اند و پودرهای آلومینیوم حامل نانوذرات SiC هستند، این پودرها از نانوذرات SiC در مقابل مذاب محافظت کرده و از تماس مستقیم نانوذرات با مذاب جلوگیری خواهند کرد. هنگامی که پودرهای میکرونی آلومینیوم در داخل مذاب حل و ذوب شدند، نانوذرات SiC در داخل زمینه آلومینیوم مذاب رها سازی می شوند. این رها سازی نانو پودرهای SiC در مدت هم زدن مکانیکی مذاب اتفاق می افتد. در ادامه با اعمال امواج مافوق صوت به نانوکامپوزیت تا مرحله ریختن در قالب، کلوخه های نانوذرات SiC کاملاً از هم باز شده و نانوذرات در داخل زمینه پخش شدگی یکنواختی بدست می آورند.

ریزساختار آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu بعد از اضافه کردن ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی نانوذرات SiC، در شکل (٦) نشان داده شده است. مطابق با شکل (٦)، با افزودن نانوذرات SiC، تغییرات ساختاری در داخل زمینه اتفاق افتاده و شاخه های دندریتی شکسته شده و شکل نهایی ریزساختار به جای ساختار دندریتی با شاخه های کشیده به ساختاری با دانه هایی به شکل گل رز در آمده اند. در ضمن با افزودن نانوذرات SiC، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در مرزدانه ها که درشت و ضخیم بودند، به صورت یکنواخت در داخل زمینه پخش شده اند. در مجموع ریزساختار حاصل از اضافه کردن نانوذرات SiC تا ۳ درصد، باعث ریزتر شدن دانه ها شده و طبق رابطه هال پچ (رابطه ۱)، با ریزتر شدن دانه ها خواص استحکامی بهتر خواهد شد. با افزایش خواص استحکامی در نتیجه سختی نمونه ها نیز افزایش خواهد یافت که باعث بهبود مقاومت به سایش نمونه های نانوکامپوزیت خواهد شد.

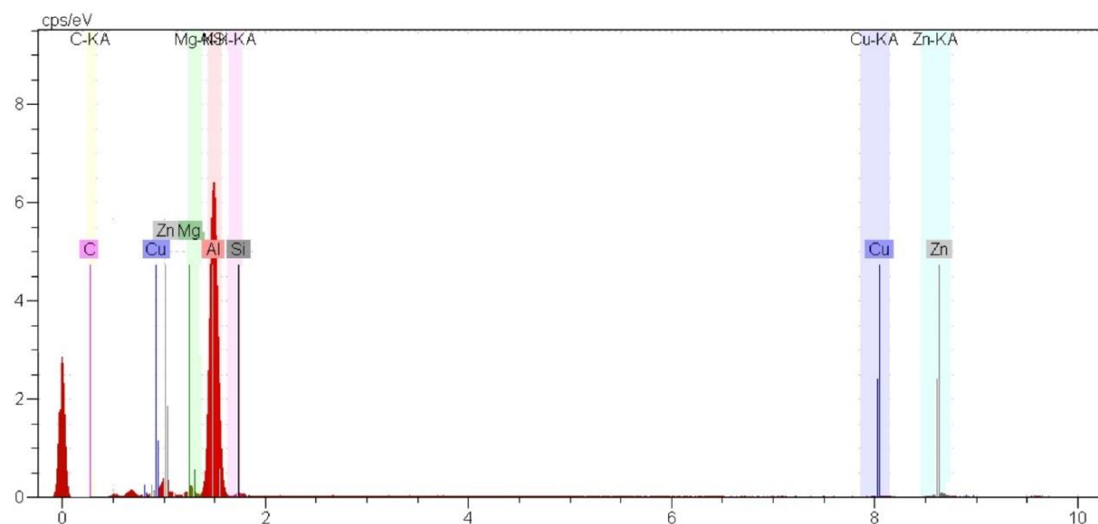
$$\sigma y = \sigma_0 + kd^{-(\frac{1}{2})} \quad (۱)$$

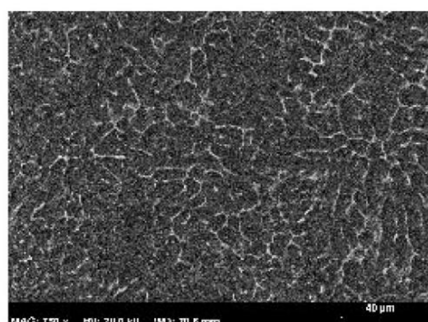
در رابطه (۱)، σy تنش تسلیم، σ0 تنش اصطکاکی، k پارامتر قفل شدن و d قطر متوسط دانه‌هاست. اثر هال پچ براساس پدیده انباشتگی نابجایی ها در مرزدانه ها توضیح داده می شود. این انباشتگی ها موجب ایجاد نواحی تمرکز تنش در مرز دانه ها می شوند که در فعال سازی چشمه های نابجایی در دانه های مجاور و انتقال آنها بین دانه ها نقش اساسی دارند. براین اساس، کوچک‌تر شدن اندازه دانه موجب محدود شدن این انباشتگی ها و در نتیجه محدودیت پخش نابجایی ها در حجم اجسام می شود. اما در درصدهای بیشتر، نانوذرات کلوخه ای شده و باعث کاهش خواص استحکامی شده اند.

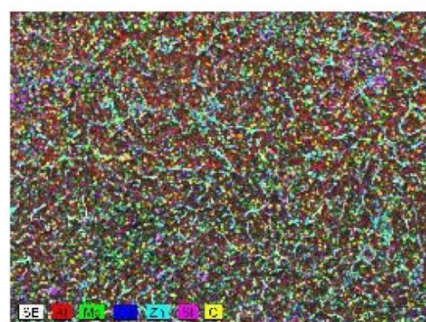
در ارتباط با توزیع یکنواخت نانوذرات در داخل زمینه نیز می توان گفت که این ذرات با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک ها در داخل زمینه هنگام اشاعه ترک باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانو کامپوزیت شده اند. پس در مجموع دو مکانیزم و پدیده مهم در داخل نانوکامپوزیت اتفاق می افتد. اول این که با اضافه کردن نانوذرات، اندازه دانه های آلیاژ زمینه کاهش می‌یابد که طبق رابطه هال پچ باعث بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود. دوم این که با افزودن نانوذرات و پخش یکنواخت این ذرات در داخل زمینه با استفاده از مکانیزم قفل کردن ترک در داخل زمینه باعث افزایش استحکام و چقرمگی نانوکامپوزیت می شود. اما در درصدهای بالاتر نانوذرات SiC (۵ درصد)، چون مقدار آن زیاد می باشد، نانوذرات به خوبی در زمینه توزیع نشده و کلوخه می‌شوند و بیشتر در مرز دانه ها تجمع می‌کنند که این کلوخه‌ای شدن نانوذرات باعث کاهش خواص مکانیکی نانو کامپوزیت می‌شود.

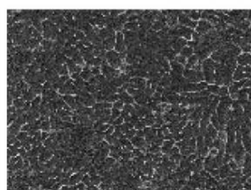


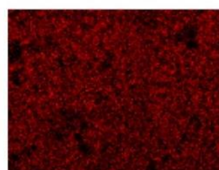
شکل ٦ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار، الف) آلیاژ پایه آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu، ب) ۱٪، ج) ۳٪، و د) ۵٪ نانوذرات SiC.

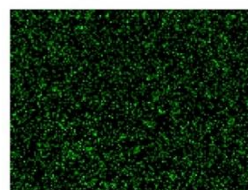


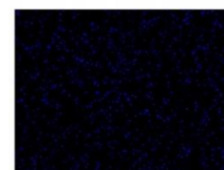

SEM image

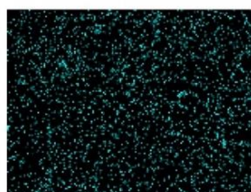

Map data

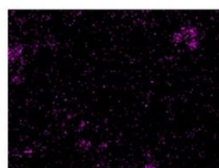

SE

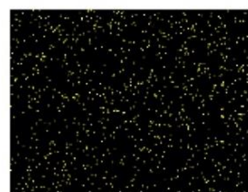

Al-K


Mg-K


Cu-KA


Zn-KA


Si-KA


C-KA

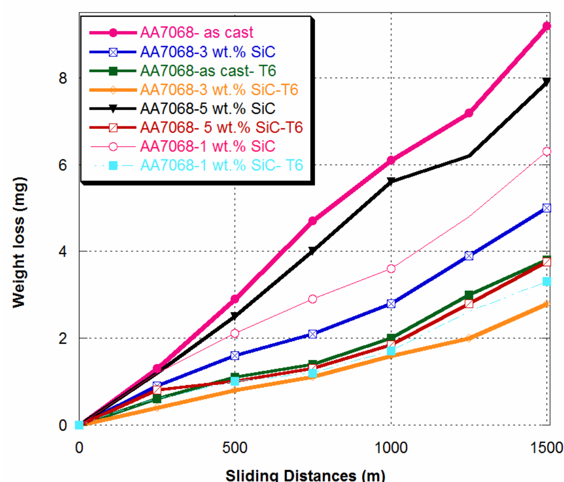
شکل ۷ آنالیز EDX و نحوه توزیع عناصر سطح نمونه نانوکامپوزیت با ۵ درصد نانوذرات تقویت کننده SiC.

در شکل (۷)، آنالیز EDX از سطح نمونه کامپوزیت زمینه آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu با ۵ درصد نانوذرات SiC و نحوه توزیع عناصر مختلف نشان داده شده است. مطابق با شکل (۷)، عناصر اصلی روی، مس و منیزیم در داخل دانه و همچنین مرزدانه ها توزیع شده اند. به علت تشکیل فاز یوتکتیک $MgZn_2$ در آلیاژ آلومینیوم Al-8Zn-3Mg-2.5Cu و حضور فاز یوتکتیک

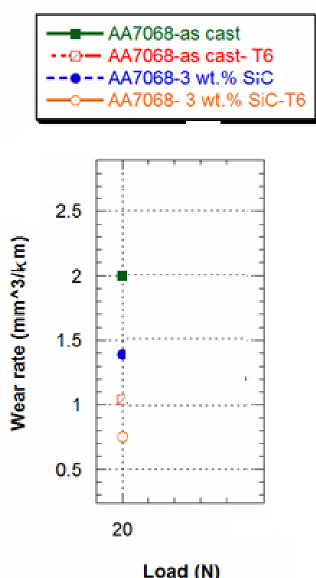
در مرزدانه ها، حضور عناصر منیزیم و روی بیشتر در مرزدانه ها و همچنین در داخل دانه ها نیز مشهود است. نانوذرات SiC با توجه به شکل (۷) دارای توزیع و پراکندگی مناسبی هستند، اما در بعضی از مناطق نمونه، این ذرات کلوخه ای شده و تجمع کرده اند که باعث کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می شود. در درصدهای پایین نانوذرات SiC، به علت درصد پایین فاز تقویت کننده، توزیع بهتری بدست می‌آید، اما در درصدهای بالاتر به علت کلوخه ای شدن، نانوذرات در حین انجماد از جبهه انجماد پس زده شده و در مرزدانه ها تجمع می‌کنند که باعث کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود.

بررسی رفتار سایش. نرخ سایش بیانگر حجم از دست رفته ماده به وسیله سایش (به میلیمتر مکعب) به ازای واحد مسافت لغزشی (به متر) است. اندازه گیری سایش به وسیله این کمیت برای مقایسه نرخ سایش در دسته‌های مختلف مواد بسیار مفید است . برای محاسبه نرخ سایش در نمونه‌های مختلف، میزان کاهش وزن در نمونه‌های نانوکامپوزیت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در شکل (۸)، کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصدهای مختلف فاز تقویت‌کننده، قبل و بعد از عملیات حرارتی به ازای اعمال نیروی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است.

در شکل (۹)، نرخ سایش نمونه‌های نانوکامپوزیت با فاز تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم برحسب نیروی ۲۰ نیوتن نشان داده شده است. نرخ سایش برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی T6 در ۲۰ نیوتن نسبت به آلیاژ پایه به ترتیب ۲/٦٧ برابر کاهش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از اضافه کردن نانوذرات و تاثیر آنها بر روی اندازه دانه، کاهش اندازه دانه باعث کاهش نرخ سایش نسبت به نمونه آلیاژ پایه شده است. علت افزایش مقاومت به سایش با کاهش اندازه دانه، افزایش سختی نمونه‌ها می‌باشد. بررسی تأثیر ریز شدن دانه‌های زمینه بر سختی آنها نشان داد که با کاهش اندازه دانه‌ها، سختی نانوکامپوزیت افزایش یافته و این افزایش سختی از رابطه تجربی هال–پچ تبعیت می‌کند. افزایش سختی، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک را به‌همراه دارد و براساس رابطه آرچارد موجب کاهش نرخ سایش می‌شود.



شکل ۸ میزان کاهش وزن نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی درصدهای مختلف نانوذرات کاربیدسیلیسیم قبل و بعد از اعمال عملیات T6 تحت نیروی ۲۰ نیوتن.

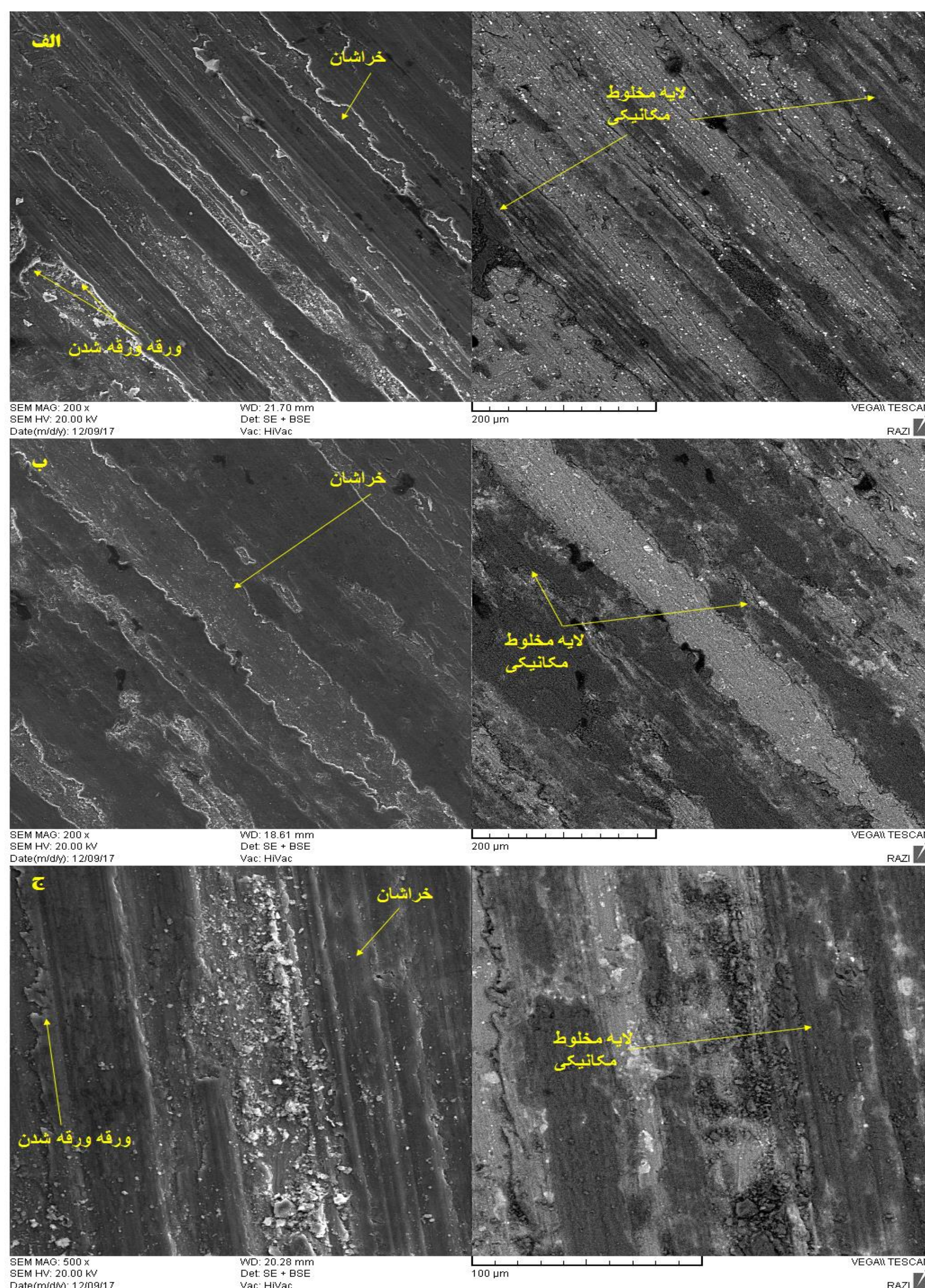


شکل ۹ نرخ سایش آلیاژ پایه و نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۳ درصد وزنی کاربیدسیلیسیم قبل و بعد از عملیات T6.

مقاومت به سایش با افزایش درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم و نانو صفحات گرافن افزایش یافته است.

بررسی سطوح سایش اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با مکانیزم‌های سایش ارائه می‌دهد. تصاویر SEM از سطوح سایش یافته برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کاربیدسیلیسیم در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با

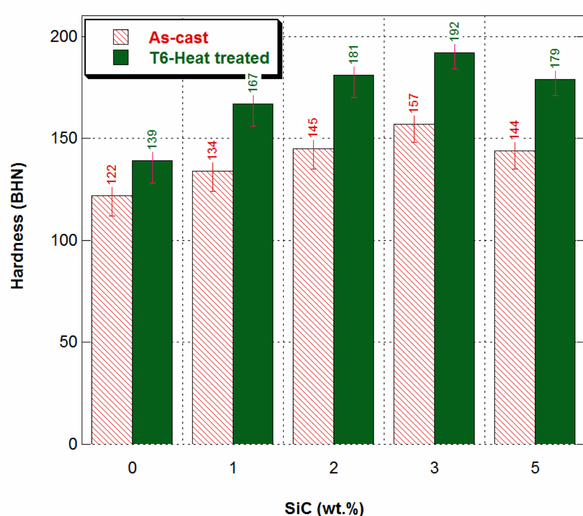
افزودن نانوذرات کاربیدسیلیسیم به علت افزایش استحکام و سختی، نرخ سایش کم می‌شود. هم‌چنین مکانیزم سایش چسبان و خراشان در نانوکامپوزیت‌های حاوی درصدهای پایین (۱ درصد وزنی) نانوذرات کاربیدسیلیسم حاکم است. اما با افزایش درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم تا ۳ درصد وزنی، استحکام و سختی بیشتر شده و نرخ سایش کاهش می‌یابد و مکانیزم سایش خراشان و ورقه ای غالب می‌شود اما با افزایش بیشتر درصد نانوذرات کاربیدسیلیسیم، این ذرات در داخل زمینه کلوخه شده و به‌صورت یکنواخت در داخل زمینه پخش نمی‌شوند و لذا باعث کاهش استحکام و سختی و افزایش نرخ سایش می‌شوند. در این حالت، در سطوح سایش کندگی‌های زیادی دیده می‌شود که دلیل آن کلوخه‌های نانوذرات کاربیدسیلیسیم می‌باشد.



شکل ۱۰ تصاویر SEM از سطوح سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم تحت نیروی ۲۰ نیوتن، الف) قبل از عملیات حرارتی T6، ب و پ) بعد از عملیات حرارتی T6.

هم‌چنین در نمونه‌هایی که تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته‌اند، نرخ سایش خیلی پایین تر از نمونه‌های بدون عملیات حرارتی می‌باشد. در مجموع عملیات حرارتی پیرسازی باعث تغییراتی در داخل ساختار آلیاژ می شود. بعد از عملیات حرارتی به علت تشکیل رسوبات ریزتر و یکنواخت‌تر در زمینه و از بین رفتن رسوبات بزرگ در حین فرآیند عملیات حرارتی، سختی و استحکام افزایش می یابد. در آلیاژهای سری 7xxx آلومینیم حاوی نانوذرات، زمان پیرسازی کمتر است و دلیل این امر حضور نانوذرات (که محل‌های مناسبی برای جوانه‌زنی رسوبات در حین پیرسازی هستند)، می‌باشد. تشکیل این رسوبات باعث افزایش استحکام و سختی نانوکامپوزیت پیرسازی شده خواهد شد و در ادامه، باعث کاهش نرخ سایش و کاهش ضریب اصطکاک می‌شود.

سختی سنجی. در شکل (۱۱) نتایج سختی‌سنجی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با درصدهای مختلف نانوذرات کاربیدسیلیسیم نشان داده شده است. در مجموع با افزودن نانوذرات، سختی تمامی نمونه‌های نانوکامپوزیت افزایش یافته است. سختی نمونه نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی نسبت به نمونه پایه ٦٧ درصد افزایش سختی مشاهده می‌شود. مظاهری و همکارانش [12] گزارش کردند که افزودن نانوذرات Al2O3 به آلیاژ آلومینیم ۳٥٦A تا میزان ۳ درصد حجمی به روش ریخته‌گری گردابی با افزایش سختی همراه است و افزودن مقادیر بیشتر از ذرات تقویت‌کننده به دلیل تشکیل کلوخه موجب کاهش سختی می‌شود. علت افزایش سختی با افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده، حضور ذرات سرامیکی و سخت در فاز زمینه و ایجاد قیدهای بیشتر برای تغییر شکل پلاستیک موضعی در مقابل فرورونده در آزمون سختی است. شن و همکارانش [13] دریافتند که سختی کامپوزیت‌های زمینه فلزی از زمینه بیشتر است. علت این امر افزایش موضعی مقدار ذرات تقویت‌کننده در زیر فرورونده به دلیل سیلان پلاستیک زمینه در حین آزمون سختی ذکر شده است. هم‌چنین با کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده قید ایجاد شده برای حرکت نابجایی‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد. به طور مشابهی همزائوی و همکارش [14] نشان دادند که سختی نانوکامپوزیت $Al/2\ vol.\%Al_2O_3$ بیشتر از میکروکامپوزیت Al/10 vol.%SiC است. الربیع و همکارانش [15] نشان دادند که با افزودن ۱۰ درصد حجمی ذرات SiC با اندازه ٤۳ میکرومتر به زمینه آلومینیم مقدار سختی از ۲۹/٦ به ۳۷/۲ ویکرز افزایش می‌یابد. همین محققین گزارش کردند که با کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده نیز مقدار سختی افزایش می‌یابد. برای کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با ۲ درصد وزنی نانوذرات Al2O3 افزایش سختی به میزان ۹۲٪ توسط ملا و همکارانش [16] گزارش شده است. به طور کلی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که با افزودن ذرات تقویت‌کننده در مقیاس کوچکتر از میکرومتر (نانومتری) به زمینه‌های فلزی نسبت به ذرات میکرومتری سطوح بالاتری از سختی قابل دستیابی است.



شکل ۱۱ نتایج آزمون سختی‌سنجی برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کاربیدسیلیسیم.

نتیجه گیری

در این تحقیق، نانوکامپوزیت‌های AlAl-8Zn-3Mg-2.5Cu/SiC به روش ریخته گری گردابی با کمک امواج مافوق صوت ساخته شدند و خواص مکانیکی و ریز ساختار آنها برر سی شد. نتایج نهایی حاصل از این مطالعه به شرح زیر هستند:

۱- در اثر اعمال فرآوری مافوق صوت بر مذاب، در ناحیه هایی از مذاب بر اثر افزایش فشار موضعی، جوانه های جامدی تشکیل می شوند. این جوانه ها باعث ایجاد ساختاری بسیار ریزتر در زمینه پس از انجماد می شوند که طبق رابطه هال پچ، افزایش خواص استحکامی زمینه را به همراه دارد.

۲- فرآوری مافوق صوت باعث شکسته شدن و پراکندگی

دندریت ها و ر سوبات در داخل فاز زمینه می شوند که از این طریق نیز افزایش خواص مکانیکی را بدنبال دارد.

۳- فرآوری آسیاب کاری پرانرژی و تولید تقویت کننده به صورت کامپوزیتی باعث توزیع و پخش یکنواخت تر نانوذرات در زمینه آلیاژ در حین ذوب و انجماد می شود.

٤- درصد بهینه برای فاز تقویت کننده نانوذرات SiC در این تحقیق با توجه به مطالعات ریزساختاری و سختی نمونه ها، ۳ درصد وزنی انتخاب شد.

٥- نتایج آزمون سایش نشان داد که با کاهش اندازه دانه، نرخ سایش کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانوذرات SiC نرخ سایش در نمونه های نانوکامپوزیت کاهش مییابد. با افزایش نانوذرات SiC تا ۳ درصد وزنی، به علت افزایش خواص مکانیکی در حین سایش، مقاومت به سایش افزایش پیدا میکند. اما با افزایش نانو نانوذرات SiC تا ٥ درصد وزنی به علت کلوخه ای شدن نانوذرات SiC ، ایجاد تمرکز تنش و تضعیف فصل مشترک نانوذرات SiC و زمینه، نرخ سایش بیشتر شده و مقاومت به سایش کاهش مییابد.

٦- نتایج سختی نشان داد که نمونه نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوذرات کاربیدسیلیسیم بعد از عملیات حرارتی نسبت به نمونه پایه ٦٧ درصد افزایش سختی نشان می دهد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] P. SenthilKumar, Padmalaya G, N. Elavarasan, B.S.Sreeja, "GO/ZnO nanocomposite - as transducer platform for electrochemical sensing towards environmental applications", *Chemosphere*, Vol. 313, pp 137345, 2023

[2] Balakrishnan Somasekaran, Alwarsamy Thirunarayanaswamy, Ilamathi Palanivel " Synthesis of Graphene and fabrication of Aluminium-Grp nanocomposites: A review ", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, pp 2436-2442, 2022.

[3] Mamta Dahiya, Virat Khann, Suneev Anil Bansal " Aluminium-graphene metal matrix nanocomposites: Modelling, analysis, and simulation approach to estimate mechanical properties" Materials Today: Proceedings, 2022.

[4] Reza Abedinzadeh, Ehsan Norouzi, Davood Toghraie " Study on machining characteristics of SiC–Al2O3 reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning ", *Ceramics International*, Vol. 48, pp 29205-29216, 2022.

[5] Shijina S.Sainudeen, Antony Joseph, Mathew Joseph, V.Sajith, " Heat transfer phenomena of copper-graphene nanocomposite coated aluminium heat spreaders", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 212, pp 118545, 2022.

[6] Miracle, D., "Metal matrix composites–from science to technological significance", *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 2526-2540, 2005.

[7] Wenzhen, L., Shiying, L., Qiongyuan, Z., Xue, Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.

[8] Hihn, JY., Doche, ML., Mandroyan, A., Hallez, L. and Pollet, BG., "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, pp. 881-887, 2011.

[9] Amirkhanlou, S., Ji, S., Zhang, Y., Watson, D., Fan, Z., "High modulus Alsingle bondSisingle bondMgsingle bondCu/Mg2Sisingle bondTiB2 hybrid nanocomposite: Microstructural characteristics and micromechanics-based

analysis" Journal of Alloys and Compounds, Vol. 694, pp. 313–324, 2017.

[10]Yan, J., Xu, Z., Shi, L., Ma, X., Yang, S., "Ultrasonic assisted fabrication of particle reinforced bonds joining aluminum metal matrix composites" Mater & Design, Vol. 32, pp. 343-347, 2011.

[11]Shabana, S., Sonawane, SH., Ranganathan, V., Pujjalwar, PH., Pinjari, DV., Bhanvase, BA., Gogate, PR., Ashokkumare, M., "Improved synthesis of aluminium nanoparticles using ultrasound assisted approach and subsequent dispersion studies in di-octyl adipate", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 36, pp. 59–69, 2017.

[12]Mazahery, H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, "Development of high-performance A356/nano-Al2O3 composites", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 518, pp. 61-64, 2009.

[13]Y.L Shen, J.J Williams, G Piotrowski, N Chawla, Y.L Guo, "Correlation between tensile and indentation behavior of particle-reinforced metal matrix composites: an experimental and numerical study", *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 3219-3229, 2001.

[14]R. Hamzaoui, O. Elkedim, E. Gaffet, "Milling conditions effect on structure and magnetic properties of mechanically alloyed Fe–10% Ni and Fe–20% Ni alloys", *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 381, pp. 363-371, 2004.

[15]K.S. Al-Rubaie, H.N. Yoshimura, J.D. Biasoli de Mello, "Two-body abrasive wear of Al–SiC composites", *Wear*, Vol. 233. pp. 444-454, 1999.

[16]S. Mula, P. Padhi, S.C. Panigrahi, S.K. Pabi, S. Ghosh, "On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al–2% Al2O3 nanocomposite", *Materials Research Bulletin*, Vol. 44, pp. 1154-1160, 2009.